

## 해수 조건에 따른 Poly(butylene succinate) 섬유의 생분해 거동 비교

김채은 · 김정규 · 허 겸\* · 진형준\*\*,\*† · 곽효원\*\*\*,†

서울대학교 농림생물자원학부, \*국립수산과학원 수산공학과, \*\*인하대학교 고분자환경융합공학전공,  
\*\*\*인하대학교 고분자공학과, \*\*\*\*서울대학교 농업생명과학연구원  
(2025년 10월 1일 접수, 2025년 11월 3일 수정, 2025년 11월 14일 채택)

## Comparison of Biodegradation Behavior of Poly(butylene succinate) Filaments under Different Seawater Conditions

Chaeun Kim, Jungkyu Kim, Gyeom Heo\*, Hyoung-Joon Jin\*\*,\*†, and Hyo Won Kwak\*\*\*,†

Department of Agriculture, Forestry and Bioresources, Seoul National University, 1 Gwanak-ro, Gwanak-gu, Seoul 08826, Korea

\*Fisheries Engineering Division, National Institute of Fisheries Science, Busan 46083, Korea

\*\*Program in Environmental and Polymer Engineering, Inha University, Incheon 22212, Korea

\*\*\*Department of Polymer Science and Engineering, Inha University, Incheon 22212, Korea

\*\*\*\*Research Institute of Agriculture and Life Sciences, Seoul National University, 1 Gwanak-ro, Gwanak-gu, Seoul 08826, Korea

(Received October 1, 2025; Revised November 3, 2025; Accepted November 14, 2025)

**초록:** 본 연구에서는 nylon 6과 poly(butylene succinate)(PBS) 필라멘트의 장기 해양 분해 거동을 인공해수와 자연 해수 조건에서 비교하였다. FE-SEM 분석에서 nylon 6은 뚜렷한 표면 침식이 발생하지 않은 반면, PBS는 인공해수 및 자연해수, 두 조건 모두에서 표면 침식을 보였다. 분자량 및 기계적 물성 분석 결과, PBS의 경우 분해 시간이 경과함에 따라 기계적 물성 약화 및 분자량 저하가 나타났으며, 특히 자연해수에서 초기 분해 속도가 더 빨랐다. 이는 자연해수에 존재하는 미생물 군집이 초기부터 PBS 분해에 관여한 반면, 인공해수에서는 초기 가수분해만 진행되고 이후 미생물 유입에 의해 분해가 촉진되었기 때문이다. 이러한 결과는 인공해수와 자연해수의 초기 미생물 분포 차이가 분해 속도와 메커니즘에 중요한 영향을 미치며, 해양 환경에서 생분해성 고분자의 운명을 이해하는 데 중요한 시사점을 제공한다.

**Abstract:** This study investigated the long-term degradation behavior of nylon 6 and poly(butylene succinate) (PBS) filaments in artificial and natural seawater. FE-SEM analysis showed no significant surface erosion in nylon 6, whereas PBS exhibited clear surface degradation under both conditions. Molecular weight and mechanical properties of PBS progressively decreased during immersion, with a faster initial degradation observed in natural seawater. This difference was attributed to indigenous microbial communities actively participating in PBS degradation from the beginning, while in artificial seawater, hydrolysis dominated initially and microbial activity accelerated only after colonization. These results demonstrate that differences in initial microbial distribution strongly influence the rate and mechanism of polymer degradation, providing valuable insights into the environmental fate of biodegradable polymers in marine ecosystems.

**Keywords:** biodegradation, seawater environment, poly(butylene succinate), nylon 6, microbial community.

## 서 론

전 세계 어업 활동에서 사용되는 어구는 어획 효율을 높이는 데 중요한 역할을 하지만, 사용 후 폐기되거나 해양에 유실될 경우 심각한 환경 문제를 야기한다.<sup>1</sup> Nylon 6과 같은 비분해성 합성 플라스틱은 높은 기계적 강도와 내구성으로 인해 널리

사용되고 있으나, 해양에 유입되면 장기간 잔존하면서 생태계에 악영향을 미친다. 특히 바다에 버려진 어구는 분해되지 않은 채 장기간 물리적 기능을 유지하여 의도치 않게 해양 생물을 포획하는 유령 어업(ghost fishing)을 유발한다. 이는 어족 자원의 감소뿐만 아니라, 해양 포유류, 조류 등 비표적 생물의 폐사로 이어져 생태계 교란을 초래한다.<sup>2,3</sup> 또한 이러한 플라스틱은 점차적으로 미세플라스틱으로 전환되어 해양 먹이망에 축적됨으로써 인간을 포함한 고차 소비자에게까지 영향을 미칠 수 있다.<sup>4,5</sup>

이와 같은 문제를 해결하기 위해, 해양 환경에서 일정 기간

†To whom correspondence should be addressed.  
bk0502@snu.ac.kr, ORCID<sup>®</sup> 0000-0003-1630-7210  
hjjin@inha.ac.kr, ORCID<sup>®</sup> 0000-0002-1763-9455

©2026 The Polymer Society of Korea. All rights reserved.

사용 후 자연적으로 분해될 수 있는 생분해 어구의 도입이 활발히 논의되고 있다. 생분해 어구는 사용 단계에서는 기존 합성 고분자와 유사한 성능을 제공하면서도, 해양에 유실될 경우 미생물 분해 또는 가수분해 과정을 통해 장기적으로 환경 부담을 줄일 수 있는 장점을 가진다.<sup>6,8</sup> 이에 따라 poly(butylene succinate)(PBS), poly(butylene adipate-co-succinate)(PBEAS), polyhydroxyalkanoates(PHAs) 등 다양한 생분해성 고분자가 어구 소재 후보로 연구되고 있다.

생분해 어구를 포함한 생분해성 플라스틱의 개발이 확대됨에 따라, 실제 사용 환경을 반영한 분해 평가 기술의 중요성이 점차 강조되고 있다. 생분해도는 고분자가 단순히 실험실 조건에서 분해되는지 여부를 넘어, 퇴비화 조건, 일반 토양, 해수, 그리고 해수/해저퇴적면 계면과 같은 다양한 노출 환경에서의 거동을 종합적으로 평가해야 한다.<sup>9</sup> 이를 위해 국제적으로 여러 표준화된 시험법이 제정되어 있으며, 예를 들어 ISO 14855 (퇴비화 조건에서의 최종 호기성 생분해도 평가), ISO 17556 (토양에서의 생분해 평가), ISO 14852 (수중 호기성 조건에서의 생분해도 측정), ASTM D6691 (해수에서의 호기성 생분해 평가) 등이 널리 활용되고 있다.<sup>10-13</sup> 특히 해양 환경은 분해 속도가 상대적으로 느리고, 분해 과정에 관여하는 미생물의 종류와 활성 또한 지역과 계절에 따라 달라지기 때문에, 해수 조건에서의 생분해 평가는 다른 환경보다 훨씬 더 어렵고 동시에 중요한 과제라 할 수 있다.<sup>14,16</sup> 따라서 생분해성 고분자의 실제 해양 거동을 이해하기 위해서는 표준 시험법과 더불어 장기적이고 현실적인 해양 조건을 반영한 연구가 필수적이다.

지금까지 실험실 수준에서 해양 환경에서의 고분자 분해 연구는 주로 인공해수를 이용한 실험에 치중되어 왔으며, 이는 일정한 염류 조성을 재현할 수 있다는 장점이 있지만 실제 해수에 존재하는 다양한 미생물 군집과 환경적 변동성을 충분히 반영하지 못한다는 한계가 있다.<sup>17,18</sup> 실제로 해양에서의 생분해 과정은 단순한 가수분해에 국한되지 않고, 미생물의 대사활동과 상호작용에 의해 크게 좌우된다. 따라서 인공해수와 자연해수 간 초기 미생물 분포 차이가 고분자의 분해 속도와 메커니즘에 어떠한 영향을 미치는지를 비교·분석하는 연구는 생분해성 소재의 실질적 환경 운명을 이해하는 데 매우 중요하다.<sup>19</sup> 본 연구진은 이전 연구에서 PBS 기반 생분해성 어구 및 복합 소재의 퇴비화 및 해양 퇴적 환경에서의 분해 거동을 규명하고, 환경 조건에 따른 분자량 저하 및 기계적 물성 변화를 보고한 바 있다.<sup>2,10</sup> 그러나 기존 연구들은 주로 퇴적층 또는 폐쇄형 해수 조건에 초점을 두어, 실제 해양에서의 인공해수와 자연해수 간 미생물 군집 차이가 고분자 분해 속도에 미치는 영향에 대한 체계적 분석은 충분히 이루어지지 않았다. 이에 본 연구에서는 상용 nylon 6과 생분해성 PBS 필라멘트를 대상으로 인공해수와 자연해수 조건에서의 장기 분해 거동을 비교하고, 특히 PBS의 경우 두 조건에서 나타나는 초기 및 장기 분해 패턴의 차이를 규명하고자 하였다.

이를 통해 해양 환경에서 생분해성 고분자의 실제 거동을 보다 명확히 이해하고, 향후 생분해 어구 소재 개발과 해양 플라스틱 저감 전략 수립에 기초 자료를 제공하고자 한다.

## 실 험

**시약 및 재료.** 본 연구에 사용된 poly(butylene succinate)(PBS) 및 nylon 6 필라멘트는 Ankor Bioplastics Co., Ltd.(Wonju, Korea)에서 제조된 그물실(fishing net filament)이며, 필라멘트와 해수는 국립수산과학원(Busan, Korea)에서 제공받아 사용하였다.

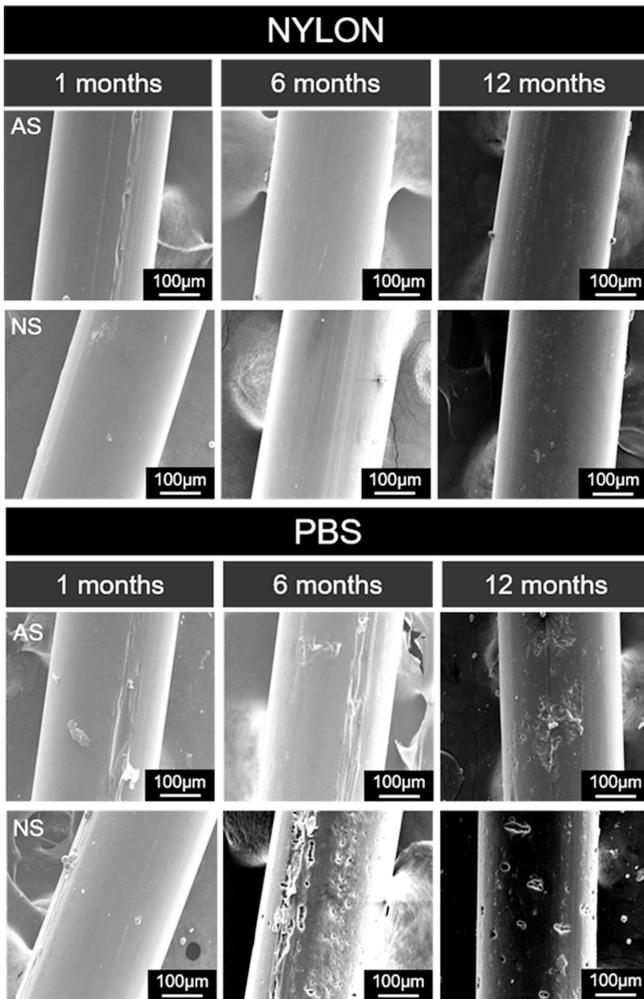
**해수 조건에서 PBS 섬유 분해.** 분해 실험은 지름 55 cm, 높이 85 cm의 플라스틱 원통형 수조 4기에 각각 208 L의 해수를 채운 후 수행하였다. 각 수조에는 PBS 또는 nylon 6 그물실이 감긴 보빈을 침지하였으며, 암조건에서 12개월간 분해 거동을 관찰하였다. 시료는 침지 후 1개월 간격으로 회수하여 표면 형태, 분자량, 기계적 특성 및 미생물 군집 분석에 사용하였다. 인공해수는 ASTM D1141 표준 조성을 참고하여 제조하였으며 인공해수와 자연해수의 염도는 모두 30±1 ppt의 조건에서 실험하였다. 실험 온도는 약 10-25 °C 범위에서 유지되었다. pH와 용존산소는 별도로 제어하지 않았으나, 자연 해수의 초기 pH는 약 8.0, 인공해수는 약 7.9 수준이었다.

**특성분석.** 분해 전후 PBS 및 nylon 6 섬유의 표면 형태 변화는 전계방출 주사전자현미경(FE-SEM, SUPRA 55VP, Carl Zeiss, Germany)을 사용하여 관찰하였다. 분자량은 젤투과크로마토그래피(GPC, NEXERA, Shimadzu, Japan)를 이용하여 분석하였다. 이때 nylon 6은 1,1,1,3,3,3-hexafluoro-2-propanol (HFIP)에 용해하였고, PBS는 chloroform에 용해하여 측정하였다. 기계적 물성은 만능시험기(UTM, Instron 345C-1, USA)를 사용하여 ISO-1805 규격에 따라 평가하였다. 각 조건별로 20회 반복 측정을 실시하여 평균값과 표준편차를 구하였으며, 인장강도-신율 곡선에서 평균값과 가장 근접한 시편의 결과를 대표값으로 제시하였다.

해수 조건에서 분해된 PBS 섬유의 미생물 군집은 16S rRNA 시퀀싱을 통해 분석하였다. 시료로부터 total genomic DNA를 DNeasy PowerSoil kit(Qiagen, Germany)로 추출한 뒤, 16S rRNA V3-V4 구간을 specific primer로 증폭하였다. PCR 산물은 정제 후 Nextera Index Kit(Illumina, USA)를 이용하여 index PCR을 수행하였고, Illumina MiSeq platform (ver. 3 600 cycles)을 사용하여 시퀀싱을 진행하였다. 최종적으로 얻어진 염기서열은 CJ Bioscience EzBioCloud 데이터 베이스를 기반으로 미생물 군집 분석을 수행하였다.

## 결과 및 토론

고분자의 표면 형태를 관찰하는 것은 장기적인 분해 거동을



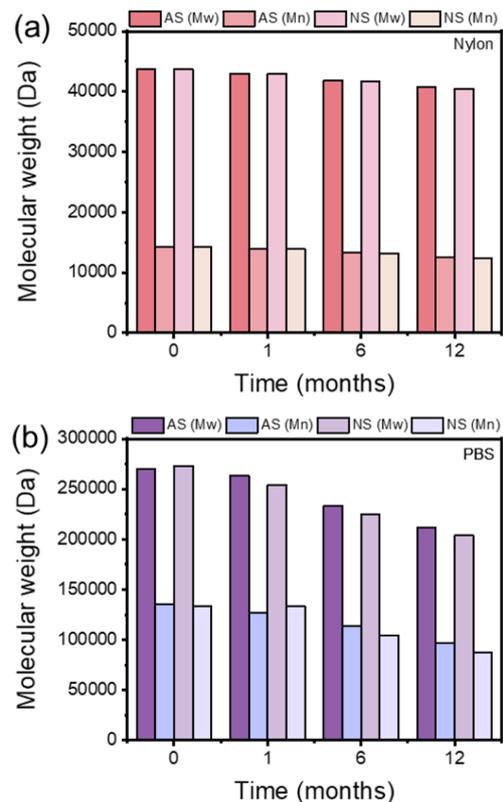
**Figure 1.** FE-SEM images of nylon 6 and PBS filament after 1, 6, and 12 months of immersion in artificial seawater (AS) and natural seawater (NS).

구명하는 데 있어 가장 직접적이고 중요한 방법 중 하나이다. 특히 어구와 같이 해양에 장기간 노출되는 플라스틱의 경우, 표면 침식이나 균열 발생은 재료의 물성 저하 및 해양 환경에서의 분해 메커니즘을 이해하는 핵심 지표가 된다.<sup>20,21</sup> 따라서 본 연구에서는 nylon 6과 PBS 필라멘트를 인공해수(AS)와 자연해수(NS)에 각각 침적시킨 뒤, 1, 6, 12개월 시점에서의 표면 형태를 FE-SEM으로 분석하였다(Figure 1). nylon 6은 인공해수와 자연해수 조건 모두에서 표면 변화가 거의 나타나지 않았다. 최대 12개월이 경과한 후에도 표면은 비교적 매끄럽게 유지되었으며, 단지 일부 미세한 균열이나 이물질 부착만이 확인되었다. 이러한 결과는 nylon 6이 해수 환경에서 가수분해나 미생물 분해에 거의 영향을 받지 않음을 보여주며, 실제 해양에서 nylon 6 어구가 장기간 분해되지 않고 축적되는 원인을 뒷받침한다.

반면 PBS 필라멘트에서는 인공해수 및 자연해수 조건 모두

에서 시간이 지남에 따라 뚜렷한 표면 침식이 확인되었다. 인공해수의 경우 초기에는 미세 균열이 관찰되었으며, 시간이 지나면서 섬유 표면에 미생물 군집이 형성된 양상을 관찰할 수 있다. 한편, 자연해수 조건에서는 보다 빠르고 뚜렷한 열화 현상이 나타났는데 6개월 이후에는 표면 거칠어짐과 균열이 확대되었고, 12개월에는 뚜렷한 공동(cavity) 형성이 나타났다. 이는 PBS가 가수분해를 기반으로 분해가 진행되면서, 자연해수에서는 초기부터 미생물 군집이 적극적으로 관여하여 분해 속도를 가속화했음을 의미한다. Nylon 6은 환경적 안정성을 유지하며 해양에서 잔존할 가능성이 크지만, PBS는 장기간 노출 시 점진적이고 가속적인 표면 열화를 거쳐 실제 해양에서 분해될 수 있음을 보여준다. 특히 인공해수와 자연해수 간 차이는 초기 미생물 분포의 유무가 분해 메커니즘과 속도에 유의미한 영향을 미친다는 점을 잘 보여주며, 이는 생분해성 소재의 해양 환경에서의 분해 거동에 있어 해수조건이 중요함을 나타낸다.

해양 환경에서의 고분자 분해 거동을 규명하기 위해 단순히 시편의 무게 감소를 측정하는 것은 충분하지 않은 경우가 많다. 실제 해수 조건에서는 분해가 점진적으로 진행되기 때문에 실험 기간 동안 뚜렷한 질량 변화가 나타나지 않거나, 표면 침식에 국한되어 내부 구조의 열화를 반영하지 못할 수 있다.<sup>22</sup>



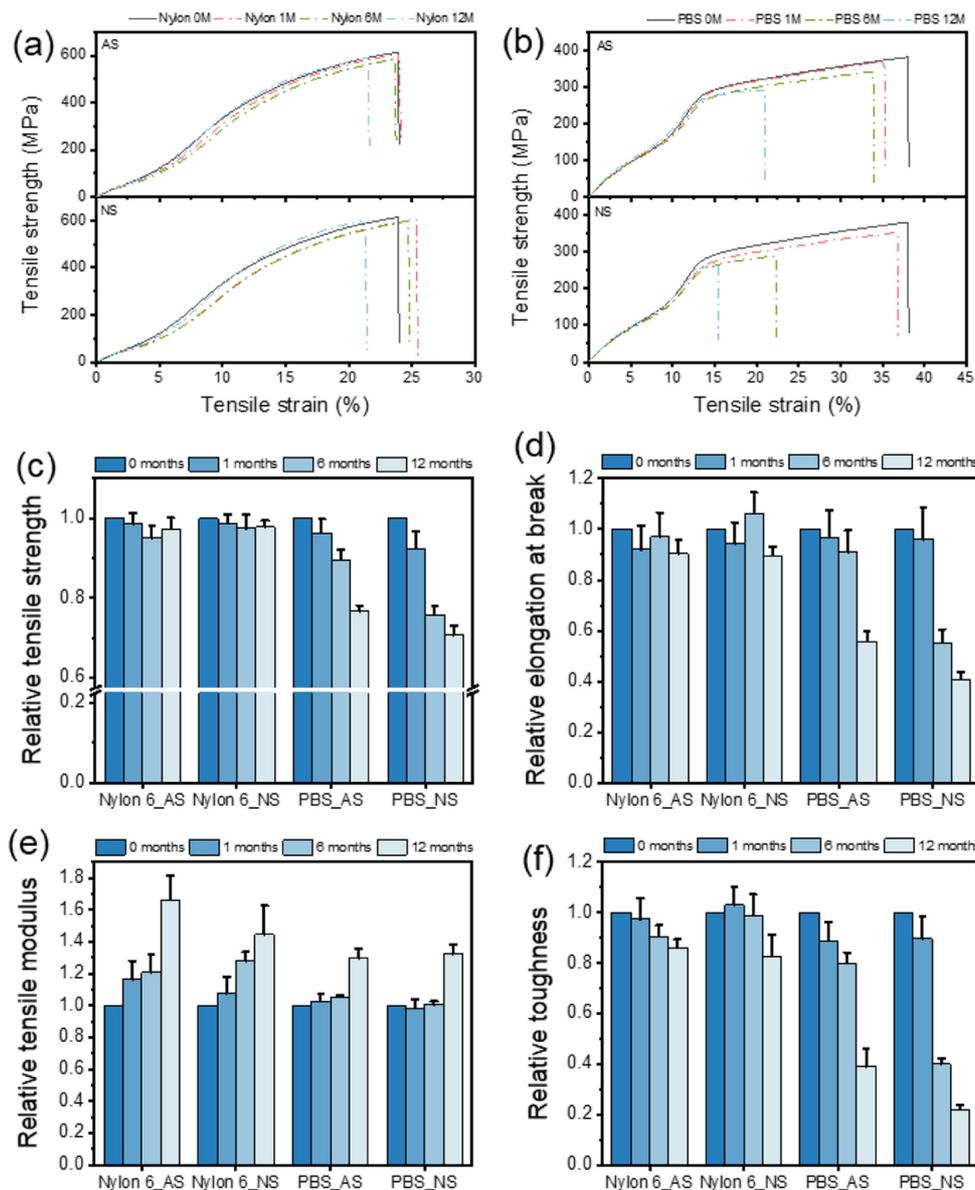
**Figure 2.** Molecular-weight changes of the nylon 6 and PBS samples during degradation: (a) nylon 6; (b) PBS.

따라서 본 연구에서는 시편의 분자량 변화를 측정하여 고분자의 사슬 절단과 같은 분자 수준의 열화를 확인하고자 하였다. 이러한 접근은 생분해 과정에서 나타나는 초기 단계의 변화를 정량적으로 평가할 수 있다는 점에서 중요하다.

분석 결과, nylon 6은 인공해수와 자연해수 조건 모두에서 12개월 동안 평균 분자량의 큰 변화가 나타나지 않았다(Figure 2). 이는 앞선 FE-SEM 결과와 일관되게, nylon 6이 해수 환경에서 가수분해나 미생물 분해에 거의 영향을 받지 않고 안정적으로 잔존함을 의미한다. 반면 PBS는 두 조건에서 모두 시간이 지남에 따라 수평균분자량( $M_n$ )과 중량평균분자량( $M_w$ )

이 지속적으로 감소하였다. 특히 자연해수에서는 초기 6개월 동안 분자량이 더 빠르게 저하되었으며, 이후 인공해수와 유사한 수준으로 수렴하는 경향을 보였다. 이는 자연해수에 존재하는 미생물 군집이 초기부터 PBS 분해에 기여함으로써 분해 속도를 촉진시킨 결과로 해석할 수 있다.

이러한 결과는 해수 환경에서 고분자의 분해 평가에 있어 단순한 무게 감소 측정만으로는 충분하지 않으며, 분자량 변화를 추적하는 것이 필수적임을 보여준다. Nylon 6의 경우 구조적 안정성이 유지되어 장기적으로 해양 환경에 축적될 가능성이 크다는 점을 다시 한 번 확인하였으며, PBS는 미



**Figure 3.** Stress-Strain curves of (a) nylon 6; (b) PBS filaments; (c) tensile strength; (d) elongation at break; (e) Young’s modulus; (f) toughness of nylon 6 and PBS filaments following degradation.

생물의 존재 여부에 따라 초기 분해 속도에서 차이를 보이지만 장기적으로는 분자량 감소가 꾸준히 진행됨을 확인할 수 있었다.

고분자 수지의 분자량 저하는 분자 사슬의 절단을 의미하며, 이는 재료의 기계적 강도 저하로 이어질 수 있다. 따라서 해양 환경에서의 분해 특성을 이해하기 위해서는 단순한 무게 감소만을 관찰하는 것이 아니라, 분자량 변화와 그에 따른 기계적 물성 변화를 함께 분석하는 것이 중요하다.<sup>23</sup> 특히 해수 조건에서는 분해 속도가 상대적으로 느려 단기간에 뚜렷한 질량 감소가 나타나지 않기 때문에, 분자량과 인장 특성은 고분자의 구조적 약화와 분해 정도를 정량적으로 파악할 수 있는 핵심 지표가 된다.

실험 결과, nylon 6은 인공해수와 자연해수 조건 모두에서 12개월 동안 수평균분자량( $M_n$ )과 중량평균분자량( $M_w$ )의 변화가 5% 이내로 미미하였으며, 인장강도 역시 초기 대비 95% 이상 유지되었다(Figure 3). 파단신율과 탄성률에서도 뚜렷한 감소가 관찰되지 않아, nylon 6이 해수 환경에서 구조적 안정성을 유지하고 있음을 보여주었다. 반면 PBS의 경우 해수 조건에 관계없이 인장강도가 분해 기간이 경과함에 따라 점진적으로 감소하였다. 한편, 해수 생분해가 진행됨에 따라 인장 신도의 감소가 두드러지게 나타났으며, 그 결과 12개월 생분해 이후 분해 전 대비 인공해수에서는 47%의 인장 신도 저하가, 자연해수에서는 69%의 신도 저하가 나타났다. 분해 경과에 따른 이러한 인장신도의 저하는 결과적으로 인성

(toughness)의 저하 역시 초래하였으며 특히 자연해수 조건에서 초기 6개월 동안 더욱 급격한 기계적 물성의 저하가 나타났다. 이러한 결과는 자연해수의 미생물 군집이 PBS의 초기 분해에 적극적으로 관여하여 사슬 절단을 촉진했음을 시사한다.

이와 같이 분자량과 기계적 특성의 동반 저하는 PBS가 해수 환경에서 전형적인 생분해성 거동을 나타낸다는 것을 입증한다. 반대로 nylon 6은 분자 구조와 물성이 모두 안정적으로 유지되어, 해양 환경에서 장기간 잔존하며 생태계에 축적될 가능성이 크다는 점이 다시 확인되었다. 이와 같은 결과는 분자량 분석과 기계적 물성 평가가 해양 환경에서 고분자의 분해 거동을 규명하는 데 필수적임을 잘 보여준다. 무게 감소만으로는 파악하기 어려운 초기 분해 현상을 분자 구조와 재료 특성의 변화로 확인할 수 있었으며, PBS는 시간이 지남에 따라 구조와 물성이 동시에 저하되는 전형적인 생분해성 고분자의 특성을 나타냈다. 반대로 nylon 6은 분자량과 기계적 성질이 모두 안정적으로 유지되어, 해양에서 장기간 잔존할 수 있는 잠재적 위험성을 다시 한 번 확인할 수 있었다.

해양 환경에서 고분자의 분해는 가수분해와 같은 화학적 요인만으로 설명하기 어렵고, 해수 내 미생물 군집의 기여가 매우 크다. 따라서 인공해수와 자연해수 조건에서의 분해 전후 미생물 군집 변화를 분석하여, 분해 과정에 어떤 균주가 관여하는지를 확인하고자 하였다(Figure 4).

분해 전 분석에서 인공해수 및 자연해수 모두 *Proteobacteria*와 *Bacteroidetes*가 우점종인 것으로 나타났으며 이들은 에스터 결합을 분해하는 효소를 통해 생분해 과정에 직접적으로 참여하는 대표적인 균주군으로 알려져 있다.<sup>24,25</sup> 한편, 인공해수는 소수 균주가 우점하여 다양성이 낮았던 반면, 자연해수는 다양한 세균군이 공존하면서 더 높은 종 다양성을 나타냈다.

분해가 진행됨에 따라 인공해수에서도 점차 미생물 군집이 다양해지면서 분해 관련 세균군의 비율이 증가하는 경향을 보였다. 이에 비해 자연해수에서는 기존에 우점하던 *Proteobacteria*와 *Bacteroidetes*의 분포가 유지·강화되는 동시에, *Planctomycetes*의 상대적 비율이 뚜렷하게 높아졌다. 이러한 결과는 *Planctomycetes*가 합성 고분자의 사슬 절단과 같은 1차 분해의 핵심 주체는 아니지만, 분해 과정에서 생성된 저분자 유기물을 활용하여 군집 내 탄소 흐름을 이어가는 중요한 역할을 수행함을 시사한다.<sup>26,27</sup> 따라서 자연해수에서 분해 후 *Planctomycetes*의 증가 현상은 고분자 분해 산물이 미생물 군집 전체로 확산·활용되는 이차 대사 경로가 활성화되었음을 보여주는 지표로 해석할 수 있다.

결과적으로, 인공해수와 자연해수의 초기 미생물 분포 차이가 분해 속도와 메커니즘의 차이를 결정짓는 주요 요인이 확인되었다. 자연해수에서는 *Planctomycetes*의 존재로 인해 가수분해와 미생물 분해에서 발생한 대사 산물이 곧바로 이차 대사 경로에 활용될 수 있어, 초기 단계부터 PBS의 빠른 분해가 촉진된다. 반면 인공해수에서는 초기에는 가수분

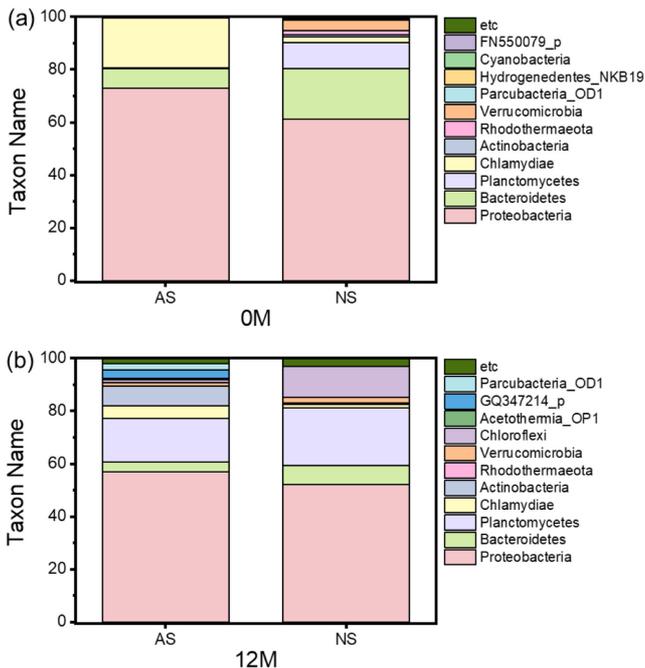


Figure 4. Microbial community profiling of PBS filament: (a) before; (b) after 12 month degradation.

**Table 1. Tensile Properties of Nylon 6 and PBS Filaments Under Biodegradation Conditions in Artificial Seawater (AS) and Natural Seawater (NS) for Different Periods**

Sample	Type	Time (months)	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)	Tensile modulus (MPa)	Toughness (MPa)
Nylon	-	0	613.9±17.8	24.0±2.3	23.9±0.3	8458.7±563.5
		1	605.6±16.2	22.1±2.1	27.8±2.8	8253.6±673.4
	AS	6	584.1±18.4	23.3±2.3	28.8±2.7	7660.3±378.5
		12	597.9±17.1	21.7±1.3	23.9±0.3	8458.7±563.5
	NS	1	606.3±13.6	22.6±2.0	25.7±2.4	8709.8±616.8
		6	598.6±21.1	25.5±2.0	30.6±1.3	8355.9±707.3
		12	601.2±9.3	21.5±0.9	34.5±4.3	6997.0±717.6
		12	601.2±9.3	21.5±0.9	34.5±4.3	6997.0±717.6
PBS	-	0	382.0±11.7	37.6±4.0	24.5±0.4	10015.1±403.6
		1	367.7±13.5	36.4±3.9	25.1±1.2	8899.2±760.2
	AS	6	341.9±10.6	34.1±3.3	25.8±0.2	7998.7±423.3
		12	293.2±5.5	21.0±1.5	31.7±1.5	3918.2±689.9
	NS	1	353.1±16.4	36.1±4.7	24.1±1.4	8986.2±888.0
		6	289.6±8.4	20.7±2.0	24.6±0.5	4015.1±214.7
		12	270.4±8.8	15.4±0.9	32.4±1.4	2216.5±191.0
		12	270.4±8.8	15.4±0.9	32.4±1.4	2216.5±191.0

해가 우세하게 진행되고, 이후 외부에서 유입된 미생물이 점차 정착하면서 분해 양상이 자연해수와 유사한 패턴으로 수렴하는 것으로 나타났다.

이러한 미생물 군집의 활성 차이는 앞서 확인된 PBS의 분자량 저하 및 기계적 물성 감소와 밀접하게 연관된다. 자연해수에서 다양한 미생물이 공존함에 따라 고분자 사슬 절단이 빠르게 진행되어 기계적 강도와 인성이 현저히 저하된 반면, 인공해수에서는 초기 미생물 활성의 지연으로 분해 속도와 물성 변화가 비교적 완만하게 나타났다. 따라서 미생물 군집의 조성과 활성 시점이 PBS의 구조적 열화 및 기계적 안정성 저하를 지배하는 핵심 요인임을 보여준다.

### 결론

본 연구에서는 nylon 6과 PBS 필라멘트의 인공해수와 자연해수 조건에서의 장기 분해 거동을 비교하였다. FE-SEM 분석과 분자량 측정 결과, nylon 6은 두 조건 모두에서 유의미한 변화가 나타나지 않아 해수 환경에서의 높은 안정성 및 비분해성을 확인할 수 있었다. 반면 PBS는 시간이 지남에 따라 표면 열화, 분자량 저하, 그리고 인장강도·파단신율·인성의 저하가 동반되어 전형적인 생분해성 고분자의 분해 거동 특성을 나타냈다. 특히 자연해수 조건에서는 초기 분해 속도가 인공해수보다 빠르게 나타났으며, 이는 자연해수 내에 존재하는 미생물 군집이 초기 단계부터 분해에 적극적으로 관여했음을 보여준다.

미생물 군집 분석을 통해, 자연해수에서는 *Proteobacteria*와

*Bacteroidetes*가 주요 분해 관련 균주군으로 작용하였고, 분해가 진행됨에 따라 *Planctomycetes*의 비율이 증가하였다. 이는 *Planctomycetes*가 직접적인 사슬 절단보다는 분해 산물을 활용하여 이차 대사 경로를 활성화하여 군집 내 탄소 흐름을 확장시키는 역할을 수행함을 시사한다. 반면 인공해수에서는 초기에는 가수분해가 우세하게 작용하고, 이후 외부 미생물이 정착함에 따라 점차 자연해수와 유사한 분해 패턴으로 수렴하였다.

종합적으로, 본 연구는 인공해수와 자연해수의 초기 미생물 분포 차이가 PBS 분해 속도와 메커니즘을 결정짓는 핵심 요인임을 규명하였다. 따라서 해양 환경에서 생분해성 고분자의 실제 운명을 이해하기 위해서는 인공해수 기반의 표준화된 시험뿐 아니라, 미생물 군집 및 다양성을 고려한 장기적이고 현실적인 평가가 반드시 수행되어야 함을 확인할 수 있었다.

**감사의 글:** 이 연구는 국립수산과학원 수산시험연구사업(R2025008)의 지원에 의해 수행되었으며 2025년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업입니다(No. RS-2025-25396489).

**이해상충:** 저자들은 이해상충이 없음을 선언합니다.

### 참고 문헌

1. Karadurmus, U.; Bilgili, L. Environmental Impacts of Synthetic Fishing Nets From Manufacturing to Disposal: A Case Study of

- Turkiye in Life Cycle Perspective. *Mar. Pollut. Bull.* **2024**, 198, 115889.
2. Kim, J.; Park, S.; Jung, S.; Yun, H. Biodegradation Behavior of Polybutylene Succinate (PBS) Fishing Gear in Marine Sedimentary Environments for Ghost Fishing Prevention. *Polym. Degrad. Stabil.* **2023**, 216, 110490.
  3. Grimaldo, E.; Herrmann, B.; Su, B.; Føre, H. M. Comparison of Fishing Efficiency Between Biodegradable Gillnets and Conventional Nylon Gillnets. *Fish Res.* **2019**, 213, 67-74.
  4. Lee, Y.; Cho, J.; Sohn, J.; Kim, C. Health Effects of Microplastic Exposures: Current Issues and Perspectives in South Korea. *Yonsei Med. J.* **2023**, 64, 301-308.
  5. Rhodes, C. J. Plastic Pollution and Potential Solutions. *Sci. Prog.* **2018**, 101, 207-260.
  6. Park, S.; Bae, B.; Cha, B. J.; Kim, Y. J. Development of Poly(butylene Adipate-co-butylene Succinate-co-ethylene Adipate-co-ethylene succinate) (PBEAS) Net Twine as Biodegradable Fishing Gear. *Mar. Pollut. Bull.* **2023**, 194, 115295.
  7. Wataniyakun, W.; Le Gall, M.; El Rakwe, M.; Karl, C. W. Biodegradable Fishing Gears: A Potential Solution to Ghost Fishing and Marine Plastic Pollution. *Mar. Pollut. Bull.* **2025**, 212, 117607.
  8. Drakeford, B. M.; Forse, A.; Failler, P. The Economic Impacts of Introducing Biodegradable Fishing Gear as a Ghost Fishing Mitigation in the English Channel Static Gear Fishery. *Mar. Pollut. Bull.* **2023**, 192, 114918.
  9. Tosin, M.; Weber, M.; Siotto, M.; Lott, C. Laboratory Test Methods to Determine the Degradation of Plastics in Marine Environmental Conditions. *Front. Microbiol.* **2012**, 3, 225.
  10. Kim, J.; Yun, H.; Won, S.; Lee, D. Comparative Degradation Behavior of Polybutylene Succinate (PBS), Used PBS, and PBS/Polyhydroxyalkanoates (PHA) Blend Fibers in Compost and Marine-sediment Interfaces. *Sustain. Mater. Technol.* **2024**, 41, e01065.
  11. Bettas Ardisson, G.; Tosin, M.; Barbale, M.; Degli-Innocenti, F. Biodegradation of Plastics in Soil and Effects on Nitrification Activity. A Laboratory Approach. *Front. Microbiol.* **2014**, 5, 710.
  12. Guo, W.; Tao, J.; Yang, C.; Zhao, Q. The Rapid Evaluation of Material Biodegradability Using An Improved ISO 14852 Method with a Microbial Community. *Polym. Test.* **2010**, 29, 832-839.
  13. Briassoulis, D.; Pikasi, A.; Papardaki, N. G.; Mistriotis, A. Biodegradation of Plastics in the Pelagic Environment of the Coastal Zone - Proposed Test Method Under Controlled Laboratory conditions. *Sci. Total Environ.* **2024**, 912, 168889.
  14. Wennberg, A. C.; Meland, S.; Grung, M.; Lillicrap, A. Unravelling Reasons for Variability in the OECD 306 Marine Biodegradation Test. *Chemosphere* **2022**, 300, 134476.
  15. Davidov, K.; Marsay, K. S.; Itzhari, S.; Rubin-Blum, M. Community Composition and Seasonal Dynamics of Microplastic Biota in the Eastern Mediterranean Sea. *Sci. Rep.* **2024**, 14, 26131.
  16. Zong, C.; Jabeen, K.; Zhu, L. Seasonal Variations in Microplastic Distribution on Macau's Windward and Leeward Beaches: Weak Spatial Autocorrelation. *Front. Mar. Sci.* **2025**, 12, 1592801.
  17. Gerritse, J.; Leslie, H. A.; de Tender, C. A.; Devriese, L. I. Fragmentation of Plastic Objects in a Laboratory Seawater Microcosm. *Sci. Rep.* **2020**, 10, 10945.
  18. Sabalina, A.; Gaidukovs, S.; Platnieks, O.; Starkova, O. Environmental Degradation and Durability of Bulk 3D-printed Parts From Biodegradable Polyester Blends of PBS, PLA, and PHB in Seawater. *RSC Sustain.* **2025**, 3, 4049-4066.
  19. Fredj, N.; Cohendoz, S.; Feaugas, X.; Touzain, S. Ageing of Marine Coating in Natural and Artificial Seawater Under Mechanical Stresses. *Prog. Org. Coat.* **2012**, 74, 391-399.
  20. Majewski, K. A.; Myszograj, S.; Pluciennik-Koropczuk, E. Surface Morphology of a Microplastic as an Indicator of Its Microscale Degradation. *Civ. Environ. Eng. Rep.* **2021**, 31, 196-213.
  21. Karl, C. W.; Bernat, S.; Arstad, B.; Kubowicz, S. Degradation Behavior of Biodegradable and Conventional Polymers for Gill Nets, Exposed to Accelerated Aging. *ACS Appl. Polym. Mater.* **2025**, 7, 2830-2840.
  22. Benito-Kaesbach, A.; Beltrán-Sanahuja, A.; Mathers, R. T.; Sanz-Lázaro, C. Understanding the Degradation of Bio-based Polymers Across Contrasting Marine Environments Using Complementary Analytical Techniques. *J. Clean Prod.* **2025**, 524, 146435.
  23. Eckel, F.; Van Opendenbosch, D.; Schandl, K. S.; Zollfrank, C. Dependency of Tensile Properties and Biodegradation on Molecular Mass During Hydrolysis of Poly(butylene succinate). *NPJ Mater. Degrad.* **2024**, 8, 97.
  24. Zhang, H.; Perez-Garcia, P.; Dierkes, R. F.; Applegate, V. The Bacteroidetes *Aequorivita* sp. and *Kaistella jeonii* Produce Promiscuous Esterases With PET-Hydrolyzing Activity. *Front. Microbiol.* **2021**, 12, 803896.
  25. Rüthi, J.; Bölsterli, D.; Pardi-Comensoli, L.; Brunner, I. The "Plastisphere" of Biodegradable Plastics Is Characterized by Specific Microbial Taxa of Alpine and Arctic Soils. *Front. Environ. Sci.* **2020**, 8, 562263.
  26. Pizzetti, I.; Fuchs, B. M.; Gerds, G.; Wichels, A. Temporal Variability of Coastal Planctomycetes Clades at Kabeltonne Station, North Sea. *Appl. Environ. Microbiol.* **2011**, 77, 5009-5017.
  27. Klimek, D.; Herold, M.; Calusinska, M. Comparative Genomic Analysis of Planctomycetota Potential for Polysaccharide Degradation Identifies Biotechnologically Relevant Microbes. *BMC Genomics* **2024**, 25, 523.

**출판자 공지사항:** 한국고분자화학회는 게재된 논문 및 기관 소속의 관할권 주장과 관련하여 중립을 유지합니다.